

## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВЕЩЕСТВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ ПО ДАННЫМ ПЭМ

Уляшев В.В.

*ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, vvulashev@geo.komisc.ru*

Традиционно импактные алмазы считаются параморфозами по графитовому веществу при очень высоких давлениях, составляющих  $\geq 30$  ГПа, что было подтверждено многочисленными экспериментами в лабораторных условиях [Курдюмов, 2012]. Данный тип алмазов вызывает большой интерес с момента их первого обнаружения и до настоящего времени, существует множество работ, посвященных механизму их образования в импактных структурах [Масайтис, 1998; Melosh, 1989]. Данный тип алмазов демонстрирует исключительные свойства – аномальную твердость и высокий коэффициент истирания.

Помимо графита импактному воздействию подвергается и слабоупорядоченный углерод с турбоэстратной структурой, а также углеродистые вещества битумного ряда (в т. ч. и угли), что было описано в связи с импактитами Карской астроблемы в 70-80-х годах двадцатого века, тогда были обнаружены необычные углеродные вещества по угольному субстрату [Езерский, 1982; Езерский, 1986]. В процессе трансформации углеродного вещества могут образовываться различные новообразованные фазы, являющиеся слабо исследованными, в том числе высокобарные полимеры углерода [Езерский, 1982]. Работы по изучению импактно метаморфизованного углистого вещества данной астроблемы возобновлены нами на современном исследовательском уровне в последние годы [Уляшев, 2018; Shumilova, 2018]. В данной работе мы приводим результаты изучения углеродных фаз полифазных импактных агрегатов по углистому веществу с применением высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии.

При изучении карских импактитов в работах В.А. Езерского [Езерский, 1982; Езерский, 1986] были описаны продукты импактного преобразования углистого вещества и выделены три типа углеродных веществ – А, В и С, различающиеся по окраске, прозрачности, блеску и температуре сгорания. Фазовый состав был определен методом Лауэ, типы В и С были диагностированы, как алмазы. Особый интерес вызывал тип А, который был диагностирован фазой с промежуточным состоянием между углем и алмазом [Езерский, 1982]. К нему были отнесены черные, смолянисто-черные частицы, непрозрачные с металлическим блеском, темпера-

тура начала экзотермического эффекта 520–550 °С. Данные зерна царапали стекло и оставляли черный след на корундовой пластине, некоторые были тверже корунда. Вещество А типа В.А. Езерский относил к природному высокобарному углеродному полимеру и предлагал считать самостоятельным минеральным видом, который получил название «тогорит» по месту нахождения в устье ручья Тохорейяха на территории Карской астроблемы [Езерский, 1982].

В ходе исследований нами были отобраны индивидуальные углеродные зерна, соответствующие по идентификационным признакам веществу типа А («тогорит»). При детальном изучении с помощью ПЭМ агрегата черного цвета, по данным электронной дифракции нами установлено, что данные зерна с необычными свойствами и структурой на самом деле представляют собой полифазные сращения стеклоподобного углерода, нанокристаллического алмаза и графита [Уляшев, 2018].

Стеклоподобный углерод является основной импактной углеродной фазой Карской астроблемы, фазовое состояние было установлено с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния в работе [Shumilova, 2018]. Проанализированные частицы стеклоглерода в исследованном агрегате представляют собой обломки с плавными очертаниями размерами от 1 до 10 мкм, без кристаллографических признаков, текстура обломков плотная. Фрагменты сложены глобулами размерами 70 – 100 нм, дифракционная картина отражает слабоупорядоченную структуру вещества.

При анализе снимков высокого разрешения нами обнаружено, что стеклоподобный углерод представлен несколькими типами наноструктур: многослойными графеноподобными изогнутыми лентами, луковичноподобными и полыми луковичноподобными образованиями [Уляшев, 2018].

В исследованном агрегате алмаз представлен фрагментами, размером 2-5 мкм, которые имеют неправильные очертания с «зубчатыми» краями. При подробном рассмотрении выявляется, что алмазные обособления представляют собой агрегаты, сложенные нанокристаллитами, средний размер которых составляет около 70 нм, что хорошо согласуется с полученными ранее данными атомно-силовой

микроскопии в работе [Shumilova, 2018]. Данные микроскопии высокого разрешения позволяет утверждать о нанокристаллическом строении агрегатов, сложенных алмазными кристаллитами размерами первые нанометры. Дифракционная картина нанополикристаллического агрегата алмаза представлена уширенными кольцами, соответствующие алмазным рефлексам.

Графит в исследуемых образцах является новообразованным. Возможность преобразования слабоупорядоченного углерода (битума) в нанокристаллический графит была ранее показана экспериментально [Корочанцев, 2004]. Графит в карских импактитах по данным ПЭМ представлен уплощенными поликристаллическими частицами неправильной формы, размеры которых составляют первые микрометры, на электронограммах имеется серия точечных рефлексов

По данным высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии фрагмента полифазной частицы видна зона срастания стеклоподобного углерода и нанокристаллического алмаза. Фазовая граница между ними является четкой, без структурных дефектов, развитие нанокристаллитов алмаза происходит вдоль изогнутых графитовых плоскостей.

Таким образом, в результате детальных исследований нами подтверждено, что углеродное вещество типа А, которое предполагалось считать новым самостоятельным природным высокобарным углеродным полимером, названное тогоритом, в действительности является сложным полифазным агрегатом и представляет собой плотное срастание различных углеродных фаз – стеклоподобного углерода, алмаза и графита. Проанализированные пространственные взаимоотношения между стеклоподобным углеродом и алмазом на атомарном уровне разрешения, а также особенности строения стеклоподобного углерода, позволили получить дополнительную информацию для объяснения механизма формирования алмаза из угольного вещества посредством предложенного нового двухэтапного преобразования путем пиролиза/карбонизации с последующей кристаллизацией при ограниченной (локальной) диффузии [Shumilova, 2018].

Полифазный характер образующихся импактных углеродных агрегатов вероятнее всего связан с неоднородностью первичного субстрата, а также с экстремально неравновесными Р-Т условиями формирования импактитов.

*Автор благодарен Т.Г. Шумиловой за научные консультации и ценные замечания, а также сотрудникам ТИШУМа Б.А. Кульницкому и И.А. Пережогину за данные просвечивающей электронной микроскопии.*

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-05-00516.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Езерский В.А. Записки Всесоюзного минералогического общества. 1986. Вып. 1. С. 26–33.
2. Езерский В.А. Метеоритика. 1982. Вып. 41. С. 134–140.
3. Корочанцев А.В. Ударное преобразование битумов: приложение к органическому веществу метеоритов и импактитов: Автореферат дис. канд. геол.-мин. наук. М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 2004. 27 с.
4. Курдюмов А.В., Бритун В.Ф., Ярош В.В., Даниленко А.И., Зелявский В.Б. Влияние условий ударного сжатия на превращения графита в лонсдейлит и алмаз // Сверхтвердые материалы. 2012. № 1. С. 27–37.
5. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И. и др. Алмазостные импактиты Попигайской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 1998. 179 с.
6. Уляшев В.В., Шумилова Т.Г., Кульницкий Б.А., Пережогин И.А., Бланк В.Д. Наноструктурные особенности углеродных полифазных агрегатов апоугольных продуктах импактного метаморфизма // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН № 8. Сыктывкар, 2018. С. 26–33. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-8-26-33.
7. Melosh H.J. Impact cratering, a geological process. Oxford Univ Press. New York. 1989. 245 p.
8. Shumilova T.G., Isaenko S.I., Ulyashev V.V. et al. European Journal of Mineralogy. 2018. DOI: 10.1127/ejm/2018/0030-2715.